第 41 卷 第 6 期
2024 年 12 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 41 No. 6
Dec. 2024

文章编号:1000-4939(2024)06-1306-11

一种高效的刀盘掘进过程数值模拟算法

张佳琦[1],苏翠侠[2],刘浩飞[1],张茜[1],蔡宗熙[1]

(1. 天津大学机械工程学院,300072 天津; 2. 中国铁建重工集团有限公司,410100 长沙)

摘　要:从岩土单元网格划分和接触对搜索过程两方面入手,提出一种高效的盾构刀盘掘进过程数值模拟算法。引入六结点三棱柱单元,该单元边长比接近于 1,且每一个面上的内角近似相等,相比于传统六面体单元,计算效率更高,据此建立一种高效的岩土有限元模型,并通过圆柱体单轴压缩数值模拟实验验证了模型的可靠性和高效性。根据盾构刀盘的掘进行为特点,直接得到可能发生接触的岩土网格结点,相比于传统的全局搜索,更加省时,优化了接触对搜索过程,从而提出了一种新颖高效的搜索算法,并通过自编软件开展单刀破岩过程数值模拟,验证了搜索算法的可靠性和高效性。基于自编软件和上述两种策略,使用单核 CPU 实现了实际工程中使用的复合盾构刀盘掘进全过程的直接数值模拟,得到了掘进后的岩土掌子面形貌和刀盘刀具的法向力载荷时程曲线及分布规律,并通过与商业软件仿真结果和文献得到的刀盘刀具法向力均值对比验证了自编软件的可靠性。

关键词:全断面隧道掘进机;刀盘;掘进过程;接触;有限元模型

中图分类号:TP311.1　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.010

An efficient numerical simulation algorithm of cutterhead driving process

ZHANG Jiaqi[1], SU Cuixia[2], LIU Haofei[1], ZHANG Qian[1], CAI Zongxi[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 300072 Tianjin, China;
2. China Railway Construction Heavy Industry Group Co., Ltd., 410100 Changsha, China)

Abstract: Starting from the grid division of the geotechnical elements and the searching process of the contact pair, an efficient numerical simulation algorithm of the shield cutterhead driving process is proposed. Specifically, a six-node triangular prism element is introduced, whose side length ratio is close to 1, and the interior angles on each face are approximately equal. Compared with the traditional hexahedral element, the calculation efficiency is higher; therefore, an efficient geotechnical finite element model was developed, and the reliability and efficiency of the model were verified by numerical simulation experiments of cylindrical uniaxial compression. According to the characteristics of the excavation of the shield cutterhead, the geotechnical grid nodes that may be in contact can be directly obtained. Compared with the traditional

收稿日期:2022-04-23　　**修回日期**:2022-10-24
基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2022YFC3802300)
通信作者:刘浩飞,副教授。E-mail:hfliu@tju.edu.cn
引用格式:张佳琦,苏翠侠,刘浩飞,等. 一种高效的刀盘掘进过程数值模拟算法[J]. 应用力学学报,2024,41(6):1306-1316.
ZHANG Jiaqi, SU Cuixia, LIU Haofei, et al. An efficient numerical simulation algorithm of cutterhead driving process[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(6):1306-1316.

global searching method, it is more time saving and optimizes the searching process of the contact pair. Therefore, a novel and efficient method is proposed. Additionally, the reliability and efficiency of the algorithm are verified through the software and the above two strategies; composite shield cutterhead which is used in the actual project is realized by a single core CPU; the rock face topography, the load time history curve as well as the load distribution law about normal force of the cutterhead cutter after the excavation are obtained through the simulation. The reliability of the software is verified by comparison with the mean normal force of the cutterhead cutter which is obtained by ABAQUS and literature.

Key words: full-face tunnel boring machine; cutterhead; excavation process; contact; finite element model

全断面隧道掘进机被广泛用于地下交通,运输管道等隧道工程建设[1-2]。在掘进作业过程中,刀盘作为最主要部件直接与土体接触并发生相互作用,因此刀盘的设计与优化至关重要。由于刀盘规模庞大[3],使用传统的实验方法获得刀盘载荷以及刀盘工作过程中岩土的变形、损伤、失效等信息较为困难。此外,实验法载荷施加条件单一,无法适应掘进机复杂多变的工作环境,加之成本昂贵,工程上亟须一种可替代的实验研究方法。近年来,随着数值算法的成熟以及计算机技术的快速发展,数值仿真模拟实验[4]逐渐成为研究全断面隧道掘进机掘进过程的一种重要手段。

目前,国内外对盾构掘进过程进行了大量的数值仿真研究。侯显俊[5]通过数值模拟研究了不同组合的滚刀联合破岩过程,并发现滚刀刃与岩石接触区域的宽度直接影响破岩的载荷和效率。乔金丽等[6]利用 ABAQUS 对单刀和双刀破岩过程进行数值模拟,发现滚刀主动滚动几乎没有摩擦耗能,并找到双刀破岩下的最优刀间距。江华等[7]使用 ABAQUS 软件对砂卵石地层环境下,先行撕裂刀的切削过程进行了数值模拟,得到了撕裂刀的最优刀间距。苏伟林等[8]基于 HJC (Holmquist-Johnson-Cook)模型对盾构刀具的切削过程进行了数值模拟,研究了 HJC 模型参数的确定方法,揭示了 HJC 模型能较好地反映混凝土材料切削力的趋势和大小规律。

上述工作主要研究了单把或多把刀具的破岩行为,而实际掘进过程中用于破岩的是整盘刀具,刀盘上的刀具切削与单把或者多把刀具切削特征不同,刀盘刀具在切削过程中会相互干涉且会面临悬空情况。所以,为了了解整盘刀具载荷规律以及岩土被切削过程中的变形、损伤、失效等信息,有些学者提出了针对刀盘切削的数值模拟方法,例如,韩美东等[9-10]在 ABAQUS/Explicit 环境下使用有限元法模拟了盾构刀盘掘进过程中土体的形貌变化,分析了刀盘及刀具的载荷特性,但该仿真过程计算时间长,效率较低。苏翠侠等[11]基于有限元法实现了天津地铁工程中 6.4 m 盾构刀盘掘进的数值模拟,但该过程中网格敏感性较强,计算效率不高。

此外,也有学者探究了其他掘进仿真方法,如流固耦合法[12]、光滑粒子流动力学法[13-14]、自适应网格法[15]等。这些方法都显著改善了切削仿真中因大变形而导致的网格质量问题,但是计算耗时长,又对参数存在一定的敏感性,致使其在工程应用中存在各自的局限[3]。

综上,国内外学者对单刀或多刀的切削数值模拟研究已经日趋成熟,但对于整体刀盘掘进过程,还存在数值模拟效率不高,较难实用化的不足。因此,本研究针对以上问题提出了一套用于高效模拟盾构刀盘掘进过程的新算法:首先,对岩土模型使用一种新型的网格划分方法,通过网格质量的改善,提高计算效率;其次,提出一种可以用于刀盘掘进过程的高效搜索算法,进一步提高掘进仿真效率;最后,基于开源有限元软件 FEAP 框架并整合前述新型算法,编写了完整的盾构刀盘切削模拟程序(numerical simulation of cutterhead, NSCH),并利用 NSCH 模拟了实际工程中使用的复合盾构刀盘掘进过程。

1　有限元模型

有限元数值模拟基于有限元模型,优质的有限元模型可以同时提高数值模拟的计算精度和计算效率。有限元模型即进行网格划分后的模型,因此网格划分对有限元数值模拟起着至关重要的作用。

1.1　网格划分

本研究不考虑刀盘及刀具的受载变形情况,故

将刀盘及刀具设置成刚体,并采用八结点正六面体单元进行网格划分。划分网格的目的是利用结点和单元确定刀盘及刀具的形状和刀具的刀刃环面。此外,为简化运算,不考虑刀盘和刀具的接触关系,直接通过 ANSYS 参数化建模命令 VGLUE 将划分好的刀盘和刀具有限元模型结点粘接。

为了适应圆柱体的盾构刀盘,岩土模型也采用圆柱体(实心),对实心圆柱体模型进行网格划分的传统方法是使用中性轴算法[16],但是该算法会产生网格较小的单元,造成掘进过程中的网格畸变和计算时间的浪费,故本研究提出了一种新型高效的网格划分方法。该方法采用六结点正三棱柱单元,其优点是边长比接近于 1,且每一个面上的几何内角近似相等。因此,相比于传统的网格划分方法[17],新型网格划分方法在计算过程中更加稳定,计算速度更快。六结点三棱柱单元如图 1 所示(图中数字是单元结点的本地编号)

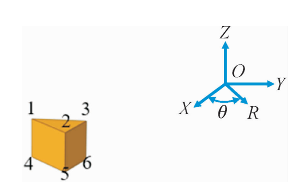


图 1 六结点三棱柱单元

Fig. 1 Six-node triangular prism element

单元类型确定之后,需要根据模型的形态和研究的问题,使用规定的划分原则对网格结点的布局进行定义。本圆柱体岩土模型主要针对刀盘掘进过程,该过程包括刀盘刀具相对于岩土表面径向、环向上的旋转运动和轴向方向上的掘进运动,由此可以确定出一套可应用于本算法有限元模型的网格划分原则,即模型径向上根据刀间距确定网格的径向间距及圈数(刀间距为相邻两把刀具参考点之间的距离,圈数为径向网格数量),模型轴向上根据刀盘进尺确定网格的轴向长度及层数(层数为轴向网格数量)。由于刀具绕岩土中心轴旋转,所以岩土网格结点在模型环向均匀分布,以达到和刀具刀刃环面均匀接触的目的。根据以上分析,岩土有限元模型的结点可以使用岩土模型径向圈数 i 、轴向层数 m 和环向点数 L ,3 个参数定位得到(图 2)。需要注意的是,第 $i+1$ 圈相比于第 i 圈的结点在半径方向增加了 ΔR (即相邻结点间的径向距离 s_r 增加了 ΔR),周长增加了 $2\pi\Delta R$ (即相邻结点间的环向距离 s_θ 增加了 $6.28\Delta R$)。为了使单元的边长比近似于 1,防止出现网格过小单元造成的网格畸变并提高计算速度,需要让第 $i+1$ 圈相比于第 i 圈多 6 个结点,以使得相邻结点间的环向距离 s_θ 和相邻结点间的径向距离 s_r 是近似相等的(即 $6.28\Delta R/6 \approx \Delta R$)。通过以上定义和分析,可以确定出岩土网格每一圈、每一层的结点数量,进而可以对结点进行编号。

第 1 层结点编号规则是,以该层的中心作为 1 号结点,然后以第 1 层第 1 圈某个结点作为 2 号结点,以此按逆时针方向递增得到第 1 层第 1 圈所有结点编号(以 1 为增量),再以圆心和 2 号结点连线的延长线与第 i 圈相交的点,作为第 i 圈结点编号的起始点,按逆时针方向递增结点号,起始点的编号是根据前一圈最后的结点编号加 1 得到;第 m 层结点编号规则是,对第 $m-1$ 层处于径向圈数 i 和环向点数 L 位置上结点的编号叠加一层的结点总数 k_0(此处 $k_0 = 1 + \dfrac{6N(N+1)}{2}$, N 为岩土有限元模型径向网格总圈数),就可以得到第 m 层第 i 圈第 L 个点的结点编号。通过以上分析,最终可以得到结点编号的公式为

$$N_d = 1 + \frac{6i(i-1)}{2} + L + k_0(m-1) \quad (1)$$

其中:N_d 为结点编号;$1 \leqslant L \leqslant 6i$ 。岩土网格结点编号示意图如图 2 所示。

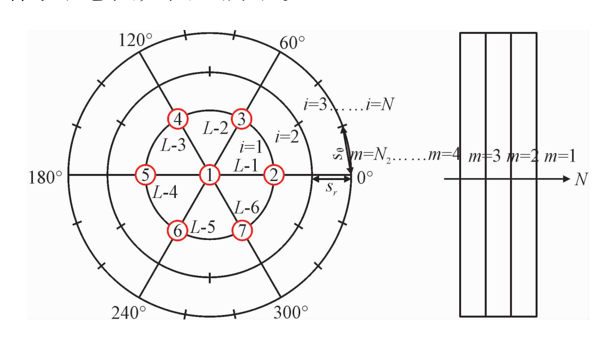


图 2 岩土网格结点编号示意图

Fig. 2 Geotechnical grid node numbering diagram

图 2 中红圈中的数字代表结点编号,“ + ”代表结点。

结点位置及编号确定之后,开始对结点坐标进行定义,因柱体模型的原因,使用极坐标系更为有利。故第 m 层第 i 圈环向第 L 个结点的坐标公式可以表示为

$$R_i = \sum_{p=1}^{i} S_p, \theta_L = \frac{\pi(L-1)}{3i}, Z_m = \sum_{a=1}^{m} Z_a \quad (2)$$

其中:R_i 是第 i 圈结点所在半径;S_p 是刀间距(或者是 $1/n$ 倍的刀间距,n 为大于 0 的整数);θ_L 是第 i 圈第 L 个结点与圆心连线和 x 轴之间的夹角(弧度制表示,逆时针为正);Z_m 是第 m 层结点的纵坐标;Z_a 是刀盘掘进位移(或者是 $1/n$ 倍的刀盘掘进位移,n 为大于 0 的整数)。

完成对结点位置、编号、坐标定义之后,开始对单元编号,同时可由单元号和单元结点的本地编号求单元结点的全局编号。单元及单元结点的全局编号涉及相邻两圈和相邻两层的结点,所以定义原点到第 1 圈为第 1 环,第 i 圈到第 $i+1$ 圈为第 $i+1$ 环,第 m 层到第 $m+1$ 层为第 m 级。为了防止网格畸变,需要让每个单元各表面的几何内角近似相等,即第 1 环,仅当有 6 个单元时,才能实现该环内所有单元 1、2、3(或 4、5、6)号结点连接形成的三角形内角是相等的;第 2 ~ N 环(此处的 N 与岩土径向网格总圈数等值),仅当第 i 圈的某个结点被第 $i+1$ 环的 3 个单元共用时(不包括第 1 环)才能实现该环所有单元 1、2、3(或 4、5、6)号结点连接形成的三角形内角是相等的。下面对第 m 级第 1 环和第 2 ~ N 环的单元编号及单元结点全局编号规则进行讨论(注意:下文所说的 1、2、3、4、5、6 号结点均为单元结点的本地编号)。

第 m 级第 1 环每个单元的 1 号结点在第 m 层的原点、2、3 号结点是第 m 层第 1 圈的任意两个相邻结点(图 3),每个单元的 1、2、3 号结点连接规则均遵从右手螺旋法则。

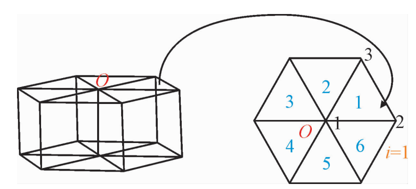


图 3　第 1 级第 1 环单元示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the first ring element on the first level

图 3 中左侧为立体图,右侧为俯视图,蓝色数字是单元号,橙色数字是圈号,黑色数字是单元结点的本地编号。

4、5、6 号结点在第 $m+1$ 层且 x、y 坐标与 1、2、3 号结点对应相同,其连接规则也遵从右手螺旋法则。单元结点全局编号确定之后,以 1、2 号结点位于 $\theta = 0^{\circ}$ 的单元为该环的第一个单元,然后按逆时针顺序(以 1 为增量)递增,对单元进行编号。

根据以上分析,单元编号及单元结点全局编号公式为

$$Ne_k(g) = \begin{cases} g + i_1\left(\left[\dfrac{g}{2}\right]\right) + k_0(m-1), g = 1,2,3 \\ g + i_1\left(\left[\dfrac{g}{2}\right]\right) + k_0 m, g = 4,5,6 \end{cases} \tag{3}$$

其中:$Ne_k(g)$ 代表第 k 个单元的第 g 个结点的编号;$k = p + \mathrm{nele}(m-1)$;$p = 1,2,\cdots,6$;$\mathrm{nele} = 3i + 3i^2$;$i_1 = p - 1$;$[x]$ 代表取 x 的整数部分。

第 m 级第 2 ~ N 环单元数量较多,为了简化表述,只研究 $\theta \in \left[0,\dfrac{\pi}{3}\right]$ 时单元及单元结点全局编号,这是因为 $\theta \in \left(\dfrac{\pi}{3},2\pi\right]$ 的单元都可以看作是由 $\theta \in \left[0,\dfrac{\pi}{3}\right]$ 的单元旋转复制得到的。在此区间内奇数号和偶数号单元在第 i 圈的结点数量不同,故需分类讨论。第 m 级第 i 环每个偶数号单元的 1、3 号结点为第 m 层第 $i-1$ 圈的任意 2 个相邻结点,2 号结点位于第 m 层第 i 圈,且与 1、3 号结点连接后形成锐角三角形;第 m 级第 i 环的奇数号单元的 2、3 号结点为第 m 层第 i 圈的任意两个相邻结点,1 号结点位于第 m 层第 $i-1$ 圈,且与 2、3 号结点连接形成锐角三角形;奇数号和偶数号单元的 1、2、3 号结点连接均遵从右手螺旋法则,其中第 1 级第 2 ~ 4 环单元号和 7、8 号单元结点全局编号如图 4 所示,

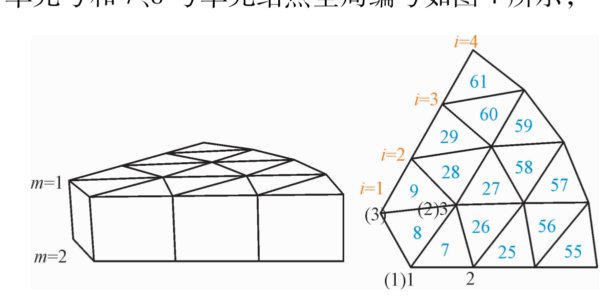


图 4　第 1 级第 2 ~ 4 环单元示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the elements which is on the 2nd to 4th rings of the 1st level

图 4 中左侧为立体图,右侧为俯视图,蓝色数字是单元号,橙色数字是圈号,不带括号的黑色数字是 7 号单元结点的本地编号,带括号的黑色数字是 8 号单元结点的本地编号。

奇数号和偶数号单元的 4、5、6 号结点在第 $m+1$ 层且与 1、2、3 号结点的 x、y 坐标对应相同,连接规则也遵从右手螺旋法则。单元编号规则和第 1 环的相同。根据以上分析,$\theta \in \left[0,\dfrac{\pi}{3}\right]$ 的单元编号及每

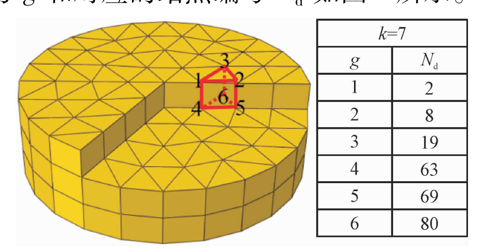
个单元的 1 号结点全局编号公式为

$$Ne_k(1) = \begin{cases} j_1 + k_1 + k_0(m-1), k \text{ 为奇数} \\ j_1 - 1 + k_1 + k_0(m-1), k \text{ 为偶数} \end{cases} \tag{4}$$

其中：$k = \frac{[6+6(2i-3)](i-1)}{2} + \text{nele}(m-1) + q_1 (q_1 = 1,2,\cdots,2i-1; i = 2,3,\cdots,N)$；$k_1 = 2 + \frac{6i(i-1)}{2}$；$j_1 = \left[\frac{q_1}{2}\right]$。

根据每个单元的 1 号结点全局编号公式结合单元结点连接规则和结点编号，可以得到每个单元上所有结点的全局编号公式，此处不再赘述。

根据以上单元以及结点编号分析，对 $N=4$，$N_2=4$ 的岩土模型进行网格划分（N_2 为岩土有限元模型的总层数），其中 $i=2$，$m=1$ 的第 1 个单元（即单元编号 $k=7$ 的单元）用红线框出，其单元结点本地编号 g 和对应的结点编号 N_d 如图 5 所示。



k=7	
g	N_d
1	2
2	8
3	19
4	63
5	69
6	80

图 5　岩土网格划分示意图

Fig. 5　Schematic diagram of geotechnical meshing

1.2　新型网格准确性及高效性验证

为验证岩土网格对计算效率的影响，现构建圆柱体模型，并使用中性轴网格划分方法和本研究提出的新型网格划分方法对岩土模型离散，在圆柱体上边界施加竖直向下的 5 mm 位移，模型及边界条件如图 6 所示。

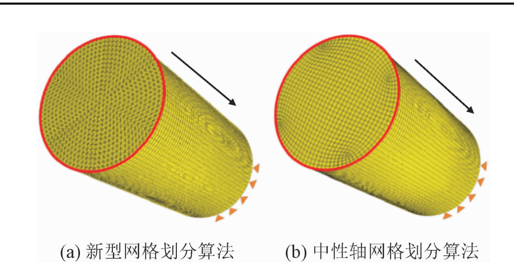


图 6　两种网格划分方法及边界条件

Fig. 6　Two meshing methods and boundary conditions

图 6 中红色标记处为位移量，黄色部分为圆柱有限元模型，箭头方向为位移方向，橙色三角代表边界固定。

两种有限元模型均使用软岩材料，材料基本参数为：单轴抗压强度 45 MPa[18]，弹性模量 10 000 MPa，泊松比 0.22，密度 2.7×10^{-9} t/mm^3，内摩擦角 50°，膨胀角 50°，允许的最大位移 10 mm，损伤因子 1.0，初始损伤时的等效塑性应变为 0.02。使用 ABAQUS 显式动力学方法和 VUMAT 中编写的修正的摩尔库伦本构模型对该动力学过程进行瞬态分析。需要注意的是，为了得到准确的数值解，先要对两种圆柱体有限元模型进行网格无关性验证，统计其加载结束后的边界轴向力结果及误差如表 1 所示。

通过表 1 网格无关性验证统计，决定使用中性轴方法将圆柱体划分成 50 160 个单元（包含 53 824 个结点），使用本研究方法将圆柱体划分成 76 950 个单元（包含 41 818 个结点），两种划分方法下的应力云图和边界轴向力结果如图 7 ~ 8 所示。

由图 8 中边界轴向力 F_z 曲线对比可知，新型网格划分方法计算精度满足条件。之后对比计算效率，两种方法的单元结点数量、单元最大、最小尺寸、边长比、增量步大小及最终的 CPU 计算时间如表 2 所示。

表 1　网格无关性验证

Tab. 1　Grid independence verification

网格划分方法		单元数	结点数	反力/kN	误差
中性轴法	对照组	23 598	25 926	11 353.3	–
	网格 1	8 322	9 628	11 313.8	0.30
	网格 2	50 160	53 824	11 360.9	0.60
本研究方法	对照组	49 248	27 202	11 363.3	–
	网格 1	12 312	7 366	11 330.3	0.30
	网格 2	76 950	41 818	11 356.2	0.06

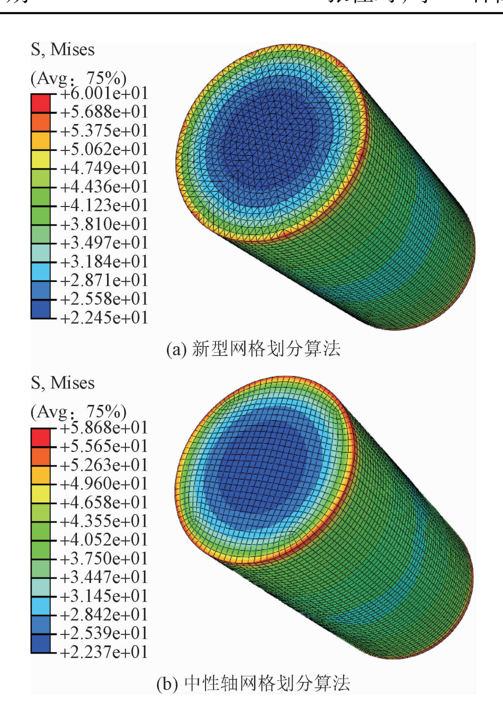


图 7　两种网格划分方法得到的 Mises 应力云图

Fig. 7　Mises stress nephogram obtained by two meshing methods

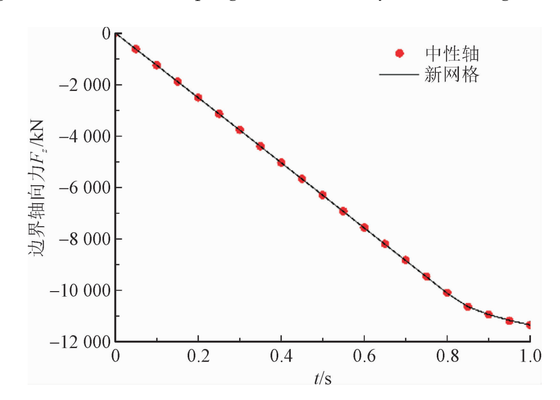


图 8　两种网格划分形式下圆柱体模型固定边界上的轴向力

Fig. 8　Axial force on fixed boundary of cylinder model under two meshing forms

表 2　中性轴网格划分方法和新型网格划分方法对比

Tab. 2　Comparison of neutral axis meshing methods and new meshing methods

项目	中性轴法	本研究方法
单元数量	50 160	76 950
结点数量	53 824	41 818
单元最大尺寸/mm	20.476 2	25.547 6
单元最小尺寸/mm	6.938 7	20.207 8
边长比	2.951 0	1.258 0
增量步大小/s	$3.943\ 7\times10^{-6}$	$6.674\ 7\times10^{-6}$
CPU 运算时间/s	3 497.2	3 120.4

通过表 2 可以看出,2 种划分方法网格密度相似的条件下,使用新型网格划分方法 CPU 计算时间减少了 10.7%。

2　岩土单元本构及相关准则

岩土单元本构及相关准则包括弹性段、塑性段,损伤段以及失效剥离段。弹性段采用线弹性模型[19],塑性段使用修正后的摩尔库伦模型[20],损伤段使用损伤演化规律[21-23],失效剥离段使用切削剥离准则[24]。另外,为防止剪切自锁,NSCH 中使用的岩土单元采用八积分点的完全积分方法(ABAQUS 沿用之前研究人员编写的 VUMAT[25])。

2.1　本构模型及相关准则可靠性验证

为了验证 NSCH 岩土本构模型和相关准则的可靠性,现分别在 NSCH 和 ABAQUS 中构建直径为 50 mm,高度为 100 mm 的圆柱模型,在模型的上表面沿轴向施加位移 2 mm,下表面固定(图 9)。

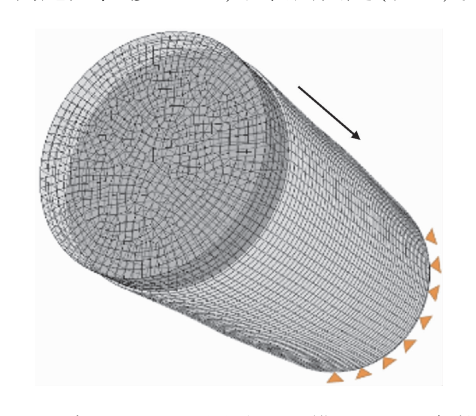


图 9　直径 50 mm 圆柱有限元模型及边界条件

Fig. 9　The finite element model of a 50 mm diameter cylinder and its boundary conditions

图 9 中阴影部分为位移量,箭头方向为位移方向,橙色三角代表边界固定。

为了和文献[25]形成对照,本模型的材料参数与文献[25]验证本构模型的材料参数相同,模型包含 35 300 个单元,38 097 个结点。使用显式动力学方法对其进行瞬态分析,加载过程中第 37 859 号结点在 NSCH 和 ABAQUS 软件中得到的 z 向反力 F_z 时程曲线如图 10 所示。

加载过程中第 9 238 号单元和 13 569 号单元在 NSCH 和 ABAQUS 软件中得到的等效塑性应变和损伤因子如表 3 所示。

在 NSCH 和 ABAQUS 软件中对圆柱有限元模型分别进行单轴压缩数值模拟实验,通过对比计算结

果,发现在 NSCH 中使用的复合型切屑剥离准则的岩土本构关系是准确可靠的。

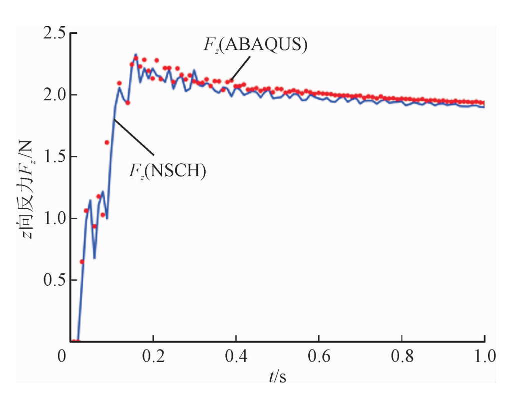


图 10 37 859 号结点的 z 向反力时程曲线

Fig. 10 Time-history curve of reaction force at node 37 859

表 3 第 9 238 号单元和 13 569 号单元在 NSCH 和 ABAQUS 软件中得到的等效塑性应变和损伤因子

Tab. 3 Equivalent plastic strain and damage factors in NSCH and ABAQUS software for elements 9 238 and 13 569

软件	单元号	等效塑性应变	损伤因子
ABAQUS	13 569	0.306 4	0.256
NSCH	13 569	0.306 9	0.256
ABAQUS	9 238	0.430 8	0.287
NSCH	9 238	0.426 0	0.280

3 高效搜索算法

3.1 高效搜索算法原理

因刀盘刀具使用刚体设置,所以刀具在每一时刻的位置是确定的,则每一时刻岩土网格上与刀具可能发生接触的结点也是可以预知的。相比于传统的全局搜索策略,此方法可以节省接触对搜索的时间。下面具体阐述该高效搜索算法的原理,假设刀盘刀具在掘进开始时与岩土表面刚好接触但不发生穿透,此时以岩土的径向网格线与刀具外环面的切点作为参考点,该点代表刀盘刀具的位置(图 11 中红星的位置),设其初始时刻的极坐标为 $(r_j^0, \theta_j^0, z_j^0)$,则 t 时刻刀具的旋转半径 r_j^t 为

$$r_j^t = r_j^0 \tag{8}$$

式中, r_j^0 为初始时刻的旋转半径(mm)。

刀具的旋转角 θ_j^t 为

$$\theta_j^t = \theta_j^0 + \omega t \tag{9}$$

式中: θ_j^0 为初始时刻的相位角(rad); ω 为刀盘旋转角速度(rad/s)。

刀具的纵坐标 z_j^t 为

$$z_j^t = v \cdot t \tag{10}$$

式中, v 为刀盘掘进速度(mm/s)。

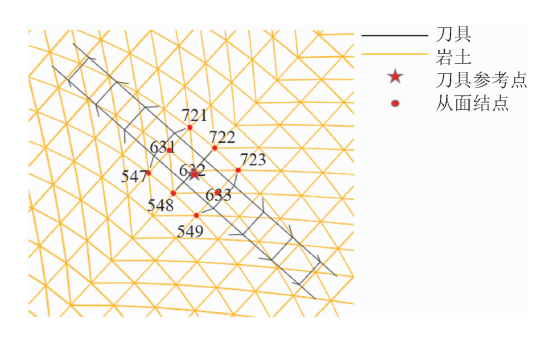


图 11 t 时刻刀具岩土接触状态

Fig. 11 The contact state of cutter and rock at time t

通过求解 t 时刻第 j 把刀具(参考点)的极坐标 $(r_j^t, \theta_j^t, z_j^t)$,利用前文定义的岩土网格结点坐标计算式(2),反算出 t 时刻距离刀具最近的岩土网格结点的圈数 i 、层数 m 、第 i 圈上的环向点数 L(如果为小数需要四舍五入取整),将这 3 个参数按顺序整合成 1×3 的行向量 $[i, m, L]$,记为 $\boldsymbol{a}_{\mathrm{p}}$,即可通过式(1)得到与刀具发生接触的结点编号。刀盘掘进数值模拟过程中随着刀盘的轴向运动,一把刀具主面与岩土网格从面结点在每一时刻可能建立多个接触对,且岩土单元在被切削过程中会出现变形和删除,结点位置发生变动,此时与刀具可能发生接触的从面结点有多个。为得到可能发生接触的每个结点的结点编号,需要对 $\boldsymbol{a}_{\mathrm{p}}$ 扩列,即 $[i_1, m_1, L_1, i_2, m_2, L_2, \cdots, i_{ns}, m_{ns}, L_{ns}]$ 简记为 $[\boldsymbol{b}_1, \boldsymbol{b}_2, \boldsymbol{b}_3, \cdots, \boldsymbol{b}_{ns}]$,并用 $\boldsymbol{a}_{\mathrm{u}}$ 表示此向量组,其中 $\boldsymbol{b}_{ns}$ 表示 $[i_{ns}, m_{ns}, L_{ns}]$ 行向量,下标 ns 代表可能发生接触的结点数量。这里要注意,第 lp 个结点的 i_{lp} 、m_{lp} 、L_{lp} $(lp = 1, 2, 3, \cdots, ns)$ 参数的变化范围是对 t 时刻距离刀具参考点最近的岩土网格结点所在圈数 i 左右扩展 Δi 圈,所在层数 m 上下扩展 Δm 层,所对应的环向点数 L 沿环向前后增加 ΔL 个点,即

$$i_{lp} \in [i - \Delta i, i + \Delta i] \tag{11}$$

$$m_{lp} \in [m - \Delta m, m + \Delta m] \tag{12}$$

$$L_{lp} \in [L - \Delta L, L + \Delta L] \tag{13}$$

另外,刀具的扁平率也会影响接触的从面结点数量。当扁平率较大时,刀宽较大,此时圈数 i_{lp} 的范围应该变大;当扁平率较小时,滚刀半径较大,曲率较小,此时环向点数 L_{lp} 的范围应该变大。

计算得到可能发生接触的从面结点编号之后,

根据最近点投影方法,将从面结点向主面投影,计算投影点和从面结点两点之间的距离,当此距离小于0 时,该投影点和从面结点建立接触对。通过相关的等效结点接触力数值计算方法[26-28],得到刀具接触面上的等效结点接触力如图 12 所示,再通过式(14)计算出作用于刀盘刀具上的接触力 $\boldsymbol{F}^{c}$ 。

$$\boldsymbol{F}^{c} = \sum_{x=1}^{N_{node}} \boldsymbol{R}_{x}^{c} \tag{14}$$

其中:N_{node} 代表刀具结点个数; $\boldsymbol{R}_{x}^{c}$ 是作用于刀具结点上的等效结点接触力向量。

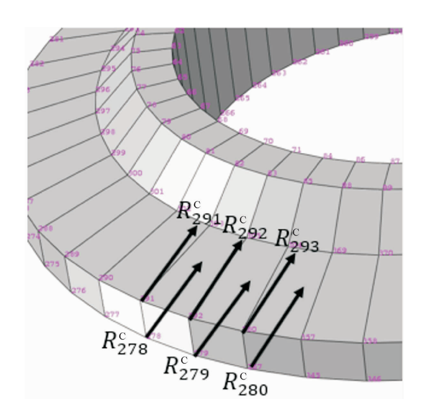


图 12　刀具等效结点接触力示意图

Fig. 12　Schematic diagram of tool equivalent node contact force

3.2　搜索算法准确性及高效性验证

本节用于验证搜索算法高效性的岩土模型材料与 1.2 节相同,模型包括岩土和其表面上的一把 18 寸单刃滚刀(图 13),边界条件为约束岩土模型的下底面和最外围环面所有结点 3 个方向的自由度。使滚刀沿岩土沿轴向位移 10 mm,并绕岩土中心轴旋转一周,总物理执行时间 1 s。两种搜索算法的计算结果和计算时间如表 4 所示,从表中可以看出 CPU 计算时间减少了 4.4%。由此认为新搜索算法可以更加高效准确地完成盾构掘进过程的数值模拟。

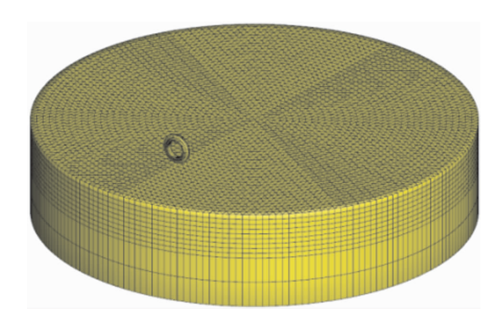


图 13　单刃滚刀破岩模型

Fig. 13　Rock breaking model with a single-edge cutter

表 4　算例使用两种索算法的法向反力均值和标准差

Tab. 4　The mean and standard deviation of the normal reaction force of the example using two different search algorithms

计算方法	反力均值/N	反力标准差/$N^{1/2}$	计算时间/s
新搜索算法	27 416	16 450.61	31 820.43
原搜索算法	27 416	16 450.61	33 290.36

4　数值算例及算法验证

本节将使用 ABAQUS 和 NSCH 对完整刀盘和刀具进行建模,并使用单一 CPU 求解,以验证前述改进算法的有效性、准确性和高效性。本数值算例包括:29 把 18 寸单刃滚刀,6 把 18 寸中心双联滚刀,12 把边滚刀,辐条、辐板、法兰盘、底座、岩土模型。刀盘模型单元数 24 047,结点数22 150,岩土模型单元数 165 000,结点数 91 812,如图 14 所示。岩土单元使用的材料参数和对岩土模型施加的边界条件与3.2 节相同,刀盘掘进速度为 24 mm/min,刀盘转速为6 r/min[29],加载曲线如图 15 所示[1],设置罚刚度为100 N/mm。

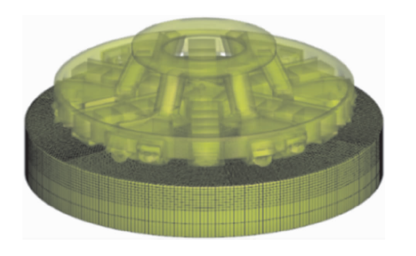


图 14　刀岩相互作用有限元模型

Fig. 14　Cutter-rock interaction finite element model

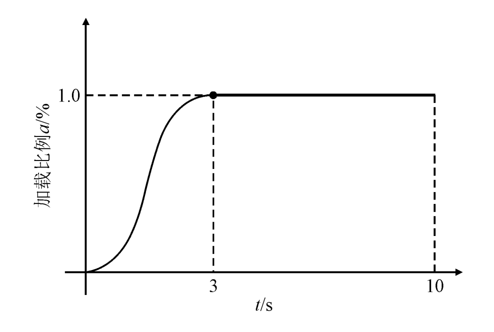


图 15　加载曲线

Fig. 15　Loading curve

图 16 为物理时间 10 s,使用新型网格划分方法以及新型高效搜索算法的 NSCH 仿真得到的盾构掘进过程中和掘进后的掌子面形貌。计算过程中质量

密度提高 100 倍(动能小于内能的 5% ~10%),稳定时间增量 $6.509\,20\times10^{-5}$ s,程序运行时间 2 d(相同条件下 ABAQUS 运行时间大于 2 d)。

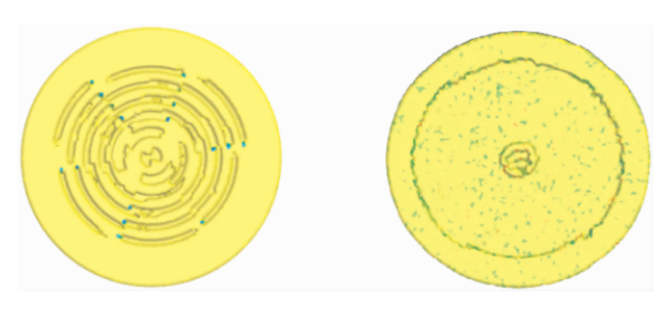


图 16　掌子面开挖形貌

Fig. 16　The excavation profile of the tunnel face

由于破岩过程中刀具的法向力是破岩载荷的最主要成分[24],所以取编号 18 号的正滚刀作为研究对象,并绘制如图 17 所示的刀具法向力时程曲线。

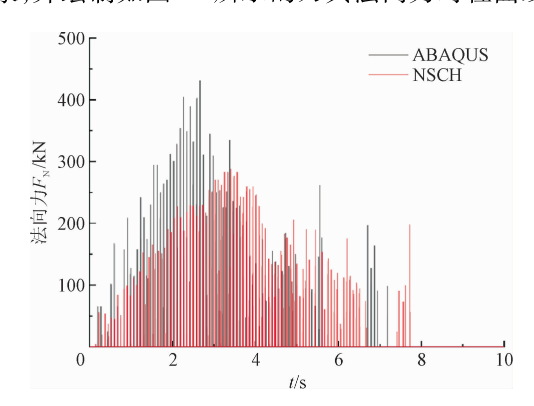


图 17　18 号正滚刀法向力时程曲线

Fig. 17　Time-history curve of normal reaction force of No. 18 positive cutter

通过曲线统计可以得到 NSCH 和 ABAQUS 下 18 号正滚刀的法向力均值及标准差,与相似条件下的单滚刀法向力均值[30]对比,结果如表 5 所示。

表 5　18 号正滚刀的法向力均值及标准差对比

Tab. 5　Comparison of the mean value and standard deviation of the normal force of No. 18 positive cutter

项目	NSCH	ABAQUS	文献[30]
法向力均值/kN	106.25	132.67	110 ~ 120
法向力标准差/N	68 321.87	82 644.08	-

对图表数据进行分析,可知 NSCH 与 ABAQUS 下运行结果的均值误差为 19.6%。推测误差的原因可能是 ABAQUS 的罚刚度设置为默认且无法修改,NSCH 是根据文献[31]设置,因此对接触力的计算产生影响。NSCH 下运行结果与文献[30]的研究结论基本一致,法向力载荷的时程曲线呈现明显的阶跃特征,这与文献[31-32]的研究一致。另外,统计发现,刀具法向力载荷分布规律近似对数正态分布,如图 18 所示。该分布趋势与文献[33]一致。故仿真结果是合理的。

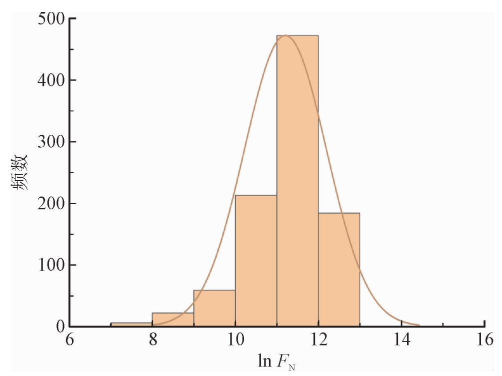


图 18　18 号正滚刀法向力载荷分布图

Fig. 18　Normal force load distribution diagram of No. 18 positive cutter

需要指出,本研究旨在提出并验证新型岩土有限元模型和高效搜索算法,采用了单核 CPU 求解较为稀疏的岩土有限元模型。此举虽然可以验证算法的有效性和高效性,但是由于 NSCH 暂不具备并行计算能力,尚不具有大规模数值仿真的能力。为此,需要在后续工作中开发并行算法并加密网格,以得到真实的刀盘总推力和总扭矩,以期为工程实践提供指导。

5　结　论

本研究提出了一种可以用于高效计算的岩土有限元模型和一种新颖高效的接触搜索算法,从而实现了盾构刀盘掘进过程的高效数值模拟算法。同时,本研究为了验证上述策略的可靠性和高效性,还开展了以下工作。

1)在 ABAQUS 中使用两种网格划分方法对圆柱模型离散,并进行圆柱单轴压缩实验,对比应力云图和边界力计算结果,发现新型网格划分方法能够准确高效地完成显式动力学数值模拟过程。

2)将之前研究人员编写的 VUMAT 中的单积分点单元本构在 NSCH 中改成八积分点单元本构,有效防止了单元剪切自锁问题。然后,在 ABAQUS 和 NSCH 下,分别对圆柱体有限元模型进行了单轴压缩数值模拟实验(该圆柱体使用本研究提到的岩土单元),验证了 NSCH 中岩土本构模型和相关准则的可靠性。

3)在 NSCH 下,使用传统的全局搜索算法和本研究提出的高效搜索算法对单刀破岩过程进行数值模拟,验证了该接触搜索算法的可靠性及高效性。

4)在 NSCH 下,使用单核 CPU 完成实际工程中使用的复合盾构刀盘的掘进过程直接数值模拟,并与 ABAQUS 和其他学者研究的刀盘刀具法向力均值和趋势进行对比,结果较为合理,证明了 NSCH 的可靠性。

参考文献:

[1] 苗圩巍,颜世铛,李纪强,等.我国全断面隧道掘进机的发展现状及发展趋势[J].内燃机与配件,2021(2):203-205.
MIAO Weiwei,YAN Shicheng,LI Jiqiang,et al. Development status and trend of tunnel boring machine(TBM)[J]. Internal combustion engine & parts,2021(2):203-205(in Chinese).

[2] 李建斌.我国掘进机研制现状、问题和展望[J].隧道建设(中英文),2021,41(6):877-896.
LI Jianbin. Current status,problems and prospects of research,design,and manufacturing of boring machine in China[J]. Tunnel construction,2021,41(6):877-896(in Chinese).

[3] 苏翠侠.基于数值仿真技术的盾构刀盘系统载荷与结构特性研究[D].天津:天津大学,2011.

[4] 徐汪豪.复合地层中盾构滚刀运动规律及受荷特征的数值分析[D].成都:西南交通大学,2020.

[5] 侯显俊.不同刃型组合的 TBM 滚刀破岩数值模拟研究[J].筑路机械与施工机械化,2020,37(12):83-91.
HOU Xianjun. Numerical simulation study on rock breaking of TBM hob with different edge combination[J]. Road machinery & construction mechanization,2020,37(12):83-91(in Chinese).

[6] 乔金丽,徐源浩,陈小强,等.基于 ABAQUS 的单双滚刀破岩分析[J].铁道建筑,2021,61(6):69-73.
QIAO Jinli,XU Yuanhao,CHEN Xiaoqiang,et al. Rock breaking analysis of single and double cutters based on ABAQUS[J]. Railway engineering,2021,61(6):69-73(in Chinese).

[7] 江华,张晋勋,唐飞鹏,等.滕忻利.北京砂卵石地层盾构先行撕裂刀切削过程数值模拟分析[J].煤炭学报,2021,46(增刊1):539-548.
JIANG Hua,ZHANG Jinxun,TANG Feipeng,et al. Numerical analysis of the cutting process of shield tunneling in Beijing sandy pebble formation[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(S1):539-548(in Chinese).

[8] 苏伟林,李兴高,许宇,等.基于 HJC 模型的盾构刀具切削混凝土数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(6):1106-1114.
SU Weilin,LI Xinggao,XU Yu,et al. Numerical simulation of shield tool cutting concrete based on HJC model[J]. Journal of Zhejiang University(engineering science),2020,54(6):1106-1114(in Chinese).

[9] 韩美东,曲传咏,蔡宗熙,等.刀盘掘进过程动态仿真[J].哈尔滨工程大学学报,2015,36(8):1098-1102.
HAN Meidong,QU Chuanyong,CAI Zongxi,et al. Dynamic numerical simulation of tunneling by the TBM cutter head[J]. Journal of Harbin Engineering University,2015,36(8):1098-1102(in Chinese).

[10] HAN M D,CAI Z X,QU C Y,et al. Dynamic numerical simulation of cutterhead loads in TBM tunnelling[J]. Tunnelling and underground space technology,2017,70:286-298.

[11] 苏翠侠,王燕群,蔡宗熙,等.盾构刀盘掘进载荷的数值模拟[J].天津大学学报,2011,44(6):522-528.
SU Cuixia,WANG Yanqun,CAI Zongxi,et al. Numerical simulation of excavation load on cutterhead in shield tunneling machine[J]. Journal of Tianjin University,2011,44(6):522-528(in Chinese).

[12] XIE L J. Estimation of two-dimension tool wear based on finite element method[D]. Karlsruhe:University Karlsruhe,2004.

[13] 刘蒙蒙.硬岩隧道掘进机滚刀布局关键问题研究[D].天津:天津大学,2013.

[14] 肖南,周小平,程浩,等.TBM 破岩机理的三维 FEM-SPH 耦合算法[J].煤炭学报,2015,40(6):1263-1269.
XIAO Nan,ZHOU Xiaoping,CHENG Hao,et al. Mechanism of rock fragmentation by TBM cutters using 3D FEM-SPH coupling method[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(6):1263-1269(in Chinese).

[15] 王敏强,陈胜宏.盾构推进隧道结构三维非线性有限元仿真[J].岩石力学与工程学报,2002,21(2):228-232.
WANG Minqiang,CHEN Shenghong. 3-Dimensional non-linear finite element simulation of tunnel structure for moving-forward shield[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2002,21(2):228-232(in Chinese).

[16] ABAQUS. ABAQUS analysis user's manual help online[M]. Providence,Rhode Island:Dassault Systems Corp,2013.

[17] 李海峰,吴冀川,刘建波,等.有限元网格剖分与网格质量判定指标[J].中国机械工程,2012,23(3):368-377.
LI Haifeng,WU Jichuan,LIU Jianbo,et al. Finite element mesh generation and decision criteria of mesh quality[J]. China mechanical engineering,2012,23(3):368-377(in Chinese).

[18] 唐建铠.探究岩石抗剪强度参数与单轴抗压强度的关系[J].广东化工,2020,47(2):38-39.
TANG Jiankai. Study on the relationship between rock shear strength parameters and uniaxial compressive strength[J]. Guangdong chemical industry,2020,47(2):38-39(in Chinese).

[19] 徐芝纶.弹性力学简明教程[M].4 版.北京:高等教育出版社,2013.

[20] 贾善坡,陈卫忠,杨建平,等.基于修正Mohr-Coulomb准则的弹塑性本构模型及其数值实施[J].岩土力学,2010,31(7):2051-2058.

JIA Shanpo, CHEN Weizhong, YANG Jianping, et al. An elasto-plastic constitutive model based on modified Mohr-Coulomb criterion and its numerical implementation[J]. Rock and soil mechanics, 2010,31(7):2051-2058(in Chinese).

[21] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear engineering and design,1984,80(2):233-245.

[22] LUBLINER J,OLIVER J,OLLER S,et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International journal of solids and structures, 1989,25(3):299-326.

[23] LEE J,FENVES G L. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams[J]. Earthquake engineering & structural dynamics,1998,27(9):937-956.

[24] 韩美东.全断面岩石掘进机刀盘掘进载荷特性与结构性能研究[D].天津:天津大学,2017.

[25] HAN M D,CAI Z X,ZHANG Y T,et al. A VUMAT of modified Mohr-Coulomb model and its application in TBM tunnelling simulation[C]//2016 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA). Piscataway,NJ,USA:IEEE,2016:1-6.

[26] YASTREBOV V A. Numerical methods in contact mechanics[M]. Hoboken,NJ,USA:John Wiley & Sons,Inc,2013.

[27] 安琪,索双富,林福严,等.磨削粗糙表面法向接触刚度研究[J].应用力学学报,2020,37(2):522-527.

AN Qi,SUO Shuangfu,LIN Fuyan,et al. Study on normal contact stiffness of rough surface[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(2):522-527(in Chinese).

[28] 胡杰,沈展鹏.基于有效接触面的螺栓连接动力学有限元建模及试验验证[J].应用力学学报,2021,38(2):756-762.

HU Jie,SHEN Zhanpeng. Dynamic finite element modeling and experiment validation of bolt joint based on effective contact area[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(2):756-762(in Chinese).

[29] 闵锐.福州轨道交通4号线1标过闽江复合盾构刀盘设计[J].上海建设科技,2020(2):27-31.

MIN Rui. Design of minjiang composite shield cutter for Fuzhou Rail Transit Line 4[J]. Shanghai construction science & technology,2020(2):27-31(in Chinese).

[30] LI X J,ZHANG Y Y,SUN X M. Numerical analysis for rock cutting force prediction in the tunnel boring process[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2021,144:104696.

[31] LABRA C,ROJEK J,OÑATE E. Discrete/finite element modelling of rock cutting with a TBM disc cutter[J]. Rock mechanics and rock engineering,2017,50(3):621-638.

[32] 孙佳程,廖少明,孙连勇,等.土岩复合地层盾构滚刀冲击荷载及振动响应分析[J].现代隧道技术,2020,57(5):167-176.

SUN Jiacheng,LIAO Shaoming,SUN Lianyong,et al. Analysis of impact load and vibration response of shield disc cutters in soil-rock composite strata[J]. Modern tunnelling technology,2020,57(5):167-176(in Chinese).

[33] FARROKH E. Layout design specifications of hard-rock TBM cutterheads at maximum cutter penetration and TBM advance[J]. Arabian journal of geosciences,2021,14(19):2049.

（编辑 李坤璐）